

P13-2025-49

Ю. Н. Пепельшев¹, Н. Д. Дикусар¹,
Ц. Цогтсайхан¹, Д. Сумхуу^{1,2}

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЭНЕРГИИ
ИМПУЛЬСОВ РЕАКТОРА **ИБР-2М**
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА
БАЗИСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Направлено в журнал «Вопросы атомной науки и техники.
Серия: Физика ядерных реакторов»

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Институт физики и технологий МАН, Улан-Батор, Монголия

Пепельшев Ю. Н. и др.

P13-2025-49

Исследование колебаний энергии импульсов реактора ИБР-2М с использованием метода базисных элементов

Проведено исследование динамики спектральной структуры шумов энергии импульсов реактора ИБР-2М с выделением базовой структуры резонансного типа с помощью метода базисных элементов. Поведение резонансной компоненты шумов в зависимости от мощности и времени работы реактора показало совпадение с результатами параллельных модельных исследований динамики реактора. Также показано совпадение базовой резонансной компоненты шумов с пиком на частоте 0,1 Гц с резонансом в амплитудно-частотной характеристике реактора ИБР-2М. Этот факт еще раз подтверждает полноту и точность оценки динамических свойств реактора с помощью используемой модели динамики и методов анализа реакторных шумов, а также применимость модели динамики и метода базисных элементов к анализу текущего состояния реактора и к оценке прогноза его состояния.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2025

Pepelyshev Yu. N. et al.

P13-2025-49

Investigation of Pulse Energy Fluctuations of the IBR-2M Reactor Using the Method of Basic Elements

The dynamics of the spectral structure of the pulse energy noise of the IBR-2M reactor has been studied with the resonant baseline subtraction from experimental data using basic elements method. The behavior of the resonant noise component depending on the reactor power and operating time has shown good agreement with the results of reactor dynamic modeling studies. The coincidence of the resonant baseline component with a peak at a frequency of 0.1 Hz and the amplitude-frequency response of the IBR-2M reactor is shown. This fact once again confirms the completeness and accuracy of the assessment of the reactor dynamic properties using dynamics model and methods of noise analysis, as well as the applicability of the dynamics model and basic elements method for the current state analysis of the reactor and forecast evaluation.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

ВВЕДЕНИЕ

Для безопасной работы импульсного реактора ИБР-2М важное значение имеет знание динамики колебаний энергии импульсов (шумов мощности) [1]. В спектральной структуре шумов ИБР-2М четко выделяются две доминирующие структуры: суперпозиция колебаний гармонического типа (линейчатая структура спектра) и непрерывные колебания резонансного типа (сплошной спектр). Последние отражают резонансные свойства активной зоны. Обе компоненты шумов существенно зависят от мощности и энерговыработки реактора. Задача исследований состояла в том, чтобы в полных колебаниях мощности выделить резонансную компоненту и оценить ее динамические свойства, т. е. изменения резонансного поведения реактора в процессе его работы. Результаты исследований напрямую связаны с оценкой устойчивости реактора.

Выделение резонансной компоненты шумов решалось с помощью созданного в ЛИТ ОИЯИ метода базисных элементов (МБЭ) [2–7]. Для оценки динамики выделенной резонансной компоненты шумов использовался весь массив данных по колебаниям энергии импульсов, зарегистрированный на ИБР-2М с 2011 до конца 2021 г. Частично использовались данные, полученные в 2025 г. при пуске реактора после временного останова (2021–2025 гг.).

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИБР-2М

Импульсный реактор ИБР-2М эксплуатируется в Дубне (Россия) с 2011 г. при проектной мощности 2 МВт (рис. 1). Реактор работает циклами: работа на мощности от 10 до 18 сут, затем перерыв на 7 сут. Импульс мощности развивается с помощью двух подвижных отражателей, вращающихся вблизи одной из граней шестигранного корпуса активной зоны (а.з.). Подвижные отражатели выполняют роль модулятора реактивности, который на короткое время переводит реактор из глубокоподкритического состояния в равновесное надкритическое. Активная зона с двуокисью плутония охлаждается жидким натрием, расход 100 м³/ч. Полная загрузка а.з. составляет 69 кассет. Регулирование уровня мощности ИБР-2М осуществляется с помощью автоматического регулятора. При аварийном сигнале на сброс мощности два блока аварийной защиты с большой скоростью перемещаются вниз и за время между импульсами

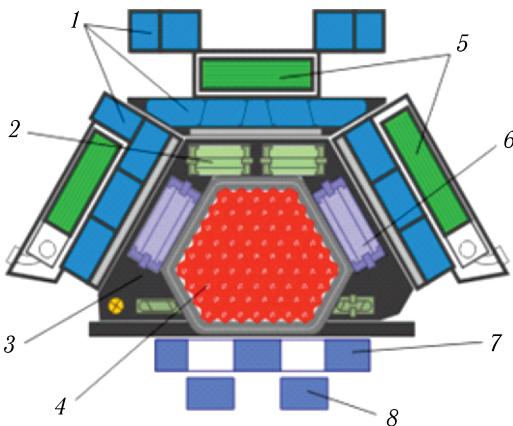


Рис. 1. Поперечный разрез активной зоны реактора ИБР-2М: 1 — водяные замедлители; 2 — стационарный отражатель; 3 — блок а. з.; 4 — тепловыделяющие сборки; 5 — холодные замедлители; 6 — органы регулирования; 7 — основной подвижный отражатель; 8 — дополнительный подвижный отражатель

переводят реактор из состояния равновесной импульсной надкритичности в подкритическое состояние. Развитие следующего импульса практически прекращается.

2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для исследования структуры шумов энергии импульсов ИБР-2М в каждом реакторном цикле (цикл — от 10 сут работы на мощности и 7 сут — перерыв) измерялась последовательность значений энергии импульсов (временной ряд $X(t)$). Длина временного ряда при частоте повторения вспышек, равной 5 с^{-1} за цикл, достигала $\sim 4 \cdot 10^6$ значений. Импульсы регистрировались с помощью трех независимых детекторов нейтронов, расположенных вокруг а. з. Зарегистрированный временной ряд обрабатывался с помощью процедур статистического и спектрального анализа. Полный временной ряд $X(t)$, зарегистрированный в течение реакторного цикла, разбивался на N_T последовательных временных рядов X_i длиной 4096. Для каждого временного ряда X_i выполнялось конечное дискретное преобразование Фурье по методу периодограмм [1]. Спектральная плотность колебаний энергии импульсов $S_X^{(i)}(f)$ определялась в виде $|S_X^{(i)}(f)|^2 = \{F[X_i(t)]\}^2$, где f — частота, F — оператор фурье-преобразования. Далее выполнялись процедуры нормализации спектров и выделения структур колебаний, объединенных некоторыми общими свойствами. В результате в шумах энергии импульсов стабильно выделялись две спектральные структуры: S_{rez} — структура резонансных колебаний и S_{lin} — линейчатая спектральная структура (колебания гармонического

типа). Структура S_{rez} в спектре колебаний энергии импульсов выделялась в виде так называемой базовой линии $S_{\text{rez}} = |S_X^{(i)}(f)|^2 - S_{\text{lin}}$.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ БАЗОВОЙ ЛИНИИ

Для большинства алгоритмов для описания базовой линии спектра применяется метод наименьших квадратов (МНК) и полиномиальная регрессия. В спектрах ИБР-2М базовые линии нелинейны, и для их определения используются МБЭ-многочлены высокой степени. На практике многочлены высоких степеней редко применяются для обработки данных из-за плохой обусловленности нормальной матрицы. Обычно обусловленность устраняется с помощью многочленов Чебышева или ортогонализации. В МБЭ проблемы обусловленности, точности, устойчивости, вычислительной сложности и качества аппроксимации решаются с помощью МБЭ-многочленов [3, 4] за счет внутренней связи независимой переменной с управляющими параметрами [5]. Примеры использования МБЭ-многочленов для анализа нейтронного шума в реакторе ИБР-2М и для сглаживания плоских кривых сложной топологии (контуров) содержатся в работах [6, 7].

В данной работе базовая линия спектра ИБР-2М приближается многочленом в форме базисных элементов Π_j и Q , представленным в виде «матрешки»:

$$P_{\text{BL}} = \Pi_0 + Q(\Pi_1 + Q(\Pi_2 + \dots + Q\Pi_m)), \quad m = \lfloor n/3 \rfloor, \quad (1)$$

где n — степень многочлена, $\Pi_j = \sum_{k=1}^3 w_k c_{kj} = \frac{-\tau(\tau-\beta)}{\alpha\gamma} c_{1j} + \frac{(\tau-\alpha)(\tau-\beta)}{\alpha\beta} c_{2j} + \frac{\tau(\tau-\alpha)}{\beta\gamma} c_{3j}$, $j = \overline{0, m}$, $Q = \tau(\tau-\alpha)(\tau-\beta)$, $\tau = x - x_0$ — переменная, x_0 , $\alpha = x - x_\alpha$, $\beta = x - x_\beta$ — параметры, $\gamma = \beta - \alpha$, $\alpha\beta\gamma \neq 0$, c_{kj} — коэффициенты. Через w_k обозначены множители при c_{kj} .

После подстановки Π_j и Q в (1) $P_{\text{BL}} = \sum_{j=0}^m \sum_{k=1}^3 b_{kj} c_{kj}$, где $b_{kj} = Q^j w_k$ — базисные функции, которые зависят от α , β , а также обнуляют ошибки на концах промежутка $[x_\alpha, x_\beta]$ и в точке x_0 .

На стадии предварительной обработки исходного спектра создается массив данных $\{\tilde{s}_i\}_{i=1}^N$, в котором «срезаны» большие пики до заданных уровней с целью уменьшить их влияние на точность и качество сглаживания (рис. 2, б). Оценки коэффициентов \hat{c}_{kj} по данным $\{\tilde{s}_i\}_{i=1}^N$, где $N = 2048$, определяются с помощью алгоритма среднеквадратичной аппроксимации (СКПА) [4, с. 45]. В МБЭ-многочлене первая тройка коэффициентов в элементе Π_0 определяется в виде среднего $\hat{c}_{k0} = (2M+1)^{-1} \sum_{l=-M}^M \tilde{s}_l$, $k = \overline{1, 3}$, по точкам $2M+1$, ближайшим к узлам x_α, x_0, x_β . При переносе Π_0 влево в (1) происходят модифи-

кация данных $\left\{ \tilde{u}_i = \tilde{s}_i - \sum_{k=1}^3 w_k(\tau_i, \alpha, \beta) \hat{c}_{k0} \right\}, i = \overline{1, N}$, и понижение степени аппроксимирующего многочлена на три. По критерию МНК $\partial \sum_{i=1}^N \left(\tilde{u}_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^3 b_{kji} c_{kj} \right)^2 / \partial c_{kj} = 0$ остальные коэффициенты определяются из решения системы нормальных уравнений $\hat{\mathbf{c}} = [\mathbf{B}^T \mathbf{B}]^{-1} \mathbf{B}^T \tilde{\mathbf{u}}$, где $[\mathbf{B}^T \mathbf{B}]^{-1}$ — нормальная матрица, $\hat{\mathbf{c}} = [\hat{c}_{11}, \hat{c}_{21}, \hat{c}_{31}, \dots, \hat{c}_{2m}, \hat{c}_{3m}]^T$, $b_{kji} = Q^j(\tau_i, \alpha, \beta) w_k(\tau_i, \alpha, \beta)$.

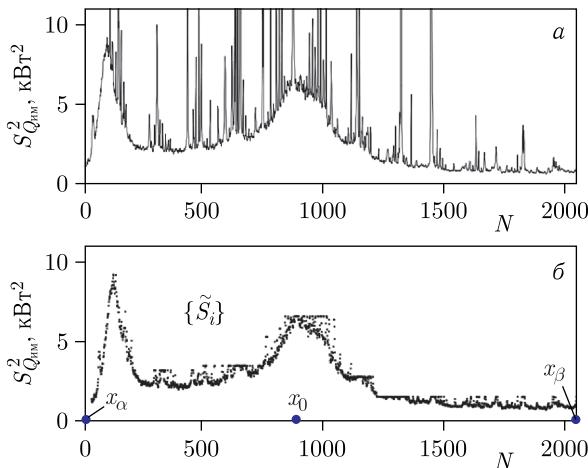


Рис. 2. Исходный спектр (а) и предварительная обработка исходного спектра (б)

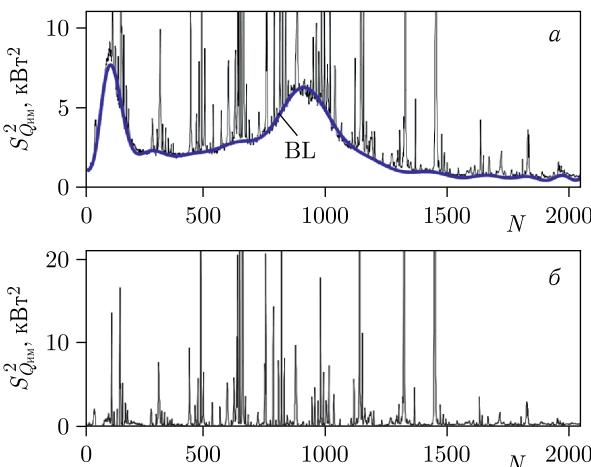


Рис. 3. Базовая линия BL (а) и линейчатый спектр S_{lin} (б)

Итак, алгоритм выделения базовой линии спектра ИБР-2М состоит из двух этапов:

- 1) предварительная обработка исходного спектра (см. рис. 2, а, б);
- 2) вычисление коэффициентов \hat{c}_{kj} (рис. 3, а) и получение линейчатого спектра (см. рис. 3, б).

Ниже в качестве иллюстрации вышеизложенного приведены некоторые пояснения. На рис. 2, а показан типичный спектр колебаний энергии импульсов, измеренный в 2014 г. на ИБР-2М. После предварительной обработки исходного спектра профиль базовой линии усеян шумовыми точками с большой дисперсией (см. рис. 2, б). В отличие от классической полиномиальной модели алгоритм СКПА можно настраивать пятью параметрами (n, M, x_0, α, β) с учетом сложности спектра. Например, сдвиг x_0 внутри промежутка $[x_\alpha, x_\beta]$ меняет параметры α и β , от которых зависят базисные функции и их производные, влияющие на уровень подавления ошибок, на точность и качество аппроксимации. Базовая линия BL (см. рис. 3, а) получена МБЭ-сглаживанием данных $\{\tilde{s}_i\}$ (см. рис. 2, б) с параметрами $n = 30, M = 5, x_0 = 877, \alpha = -876$ и $\beta = 1171$. Линейчатый спектр получен после вычитания базовой линии из исходного спектра (см. рис. 3, б).

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

В результате применения МБЭ спектральная плотность колебаний энергии импульсов во всех реакторных циклах с 2011 по 2021 г. была разделена на две составляющие: базовую линию и линейчатый спектр. На рис. 4 для примера показан результат выделения базовой линии и линейчатой части спектра колебаний энергии импульсов за разные периоды работы реактора. Характер изменения относительной дисперсии колебаний базовой части спектра и дисперсии линейчатой компоненты спектра за весь период работы реактора представлен на рис. 5, а за 2012 и 2021 гг. — в табл. 1. Видно, что до 2014 г. линейчатый спектр был основной составляющей в структуре шумов энергии импульсов. При дальнейшей работе реактора доминирует базовая резонансная компонента.

На рис. 6 показано изменение базовых линий и линейчатого спектра за весь период работы реактора: с 2011 по 2021 г.

Ниже рассмотрена каждая из двух составляющих спектра колебаний мощности.

Таблица 1. Относительная дисперсия базовой и линейчатой компоненты спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М за 2012, 2019 и 2021 г.

Год	$W, \text{ МВт}$	Относительная дисперсия, %	
		Базовые линии Δ_f	Линейчатый спектр Δ_P
2012	2	49	51
2019	1,7	72	28
2021	1,5	67	33

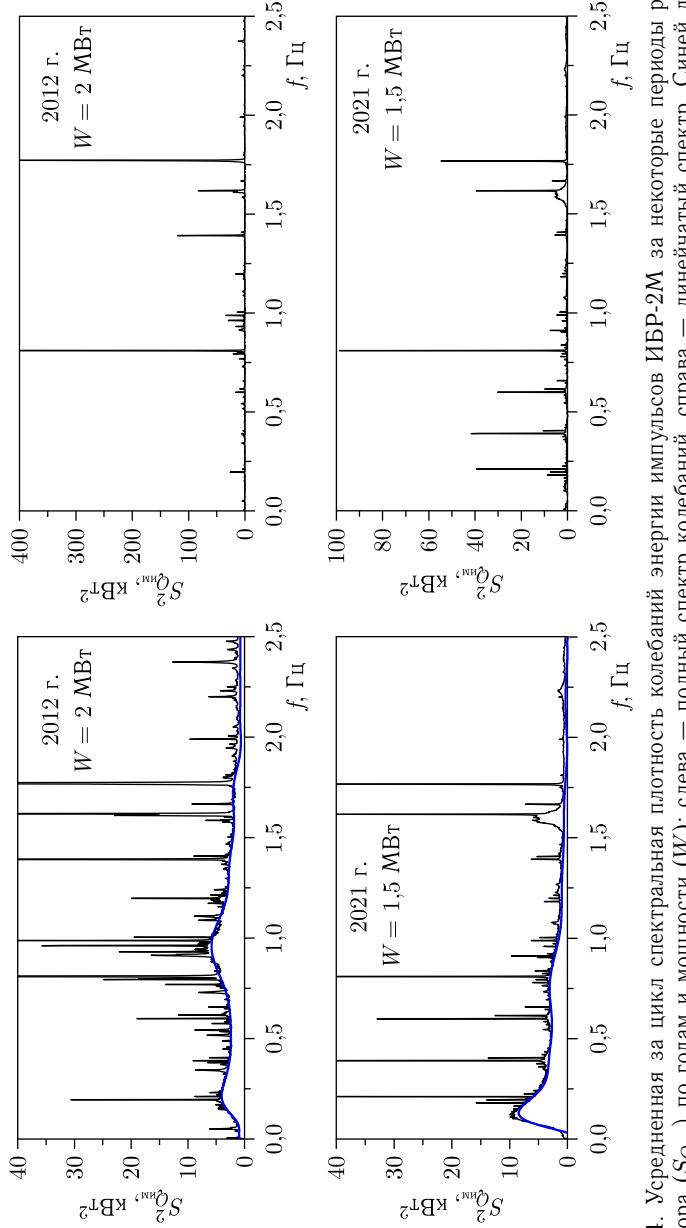


Рис. 4. Усредненная за цикл спектральная плотность колебаний энергии импульсов ИБР-2М за некоторые периоды работы реактора ($S_{Q_{\text{имк}}}^2$) по годам и мощности (W): слева — полный спектр колебаний, справа — линейчатый спектр. Синей линией выделена базовая компонента спектра

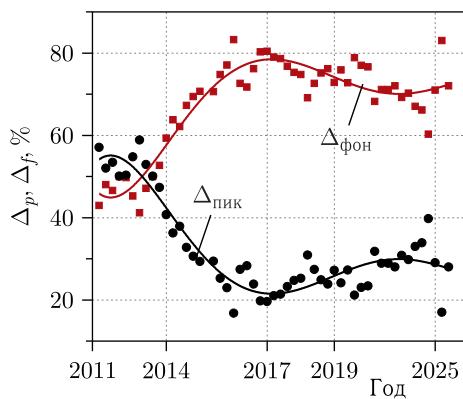


Рис. 5. Изменение относительной дисперсии базовых линий и линейчатого спектра колебаний энергии импульсов ИБР-2М в процессе работы реактора с 2011 по 2025 г.

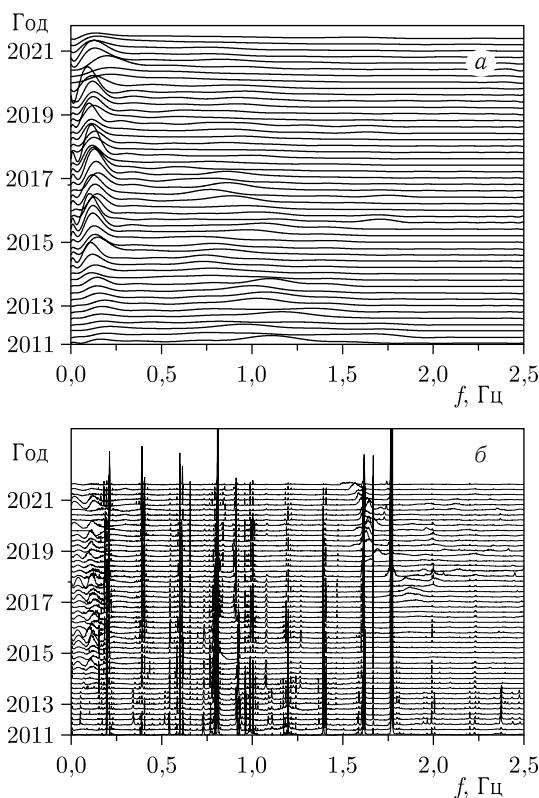


Рис. 6. Изменение базовых линий (а) и линейчатого спектра (б) в колебаниях энергии импульсов ИБР-2М за весь период работы реактора: с 2011 по 2021 г. (до останова реактора на замену оборудования)

5. ЛИНЕЙЧАТАЯ КОМПОНЕНТА СПЕКТРА

При удалении из полного спектра колебаний энергии импульсов базовой компоненты в спектре колебаний мощности остается только группа колебаний гармонического характера. Изучение ее структуры показало, что линейчатая компонента шумов содержит элементы разного происхождения. Во-первых, это элементы ударного характера: серия линий с шагом 0,2 Гц в диапазоне 0,2–2,4 Гц (см. рис. 6). Ударные компоненты в спектре колебаний мощности понимаются как колебания, инициируемые резким импульсным воздействием реактивности. Причиной появления ударного воздействия реактивности, вероятнее всего, могут быть небольшие дефекты в приводе модулятора реактивности. Ранее на реакторе ИБР-2 были зафиксированы ударные компоненты реактивности, действующие со стороны привода подвижных отражателей и от газодинамических эффектов при встречном вращении лопастей подвижных отражателей [9]. Изменение амплитуды колебаний ударных компонент в линейчатой части спектра ИБР-2М в зависимости от мощности реактора показано на рис. 7. Видно,

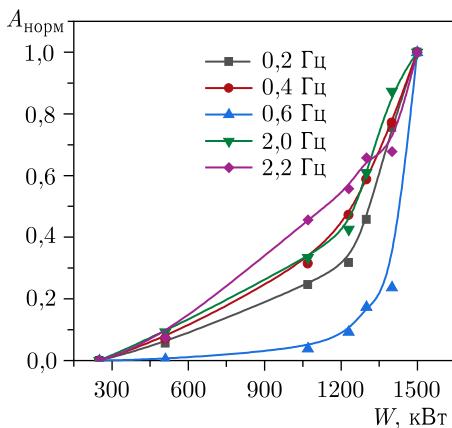


Рис. 7. Изменение амплитуды колебаний ударных компонент энергии импульсов ИБР-2М на частотах, кратных 0,2 Гц, в зависимости от мощности

Таблица 2. Источник возмущений основных элементов линейчатого спектра колебаний энергии импульсов

Частота $f, \text{ Гц}$	Источник возмущений
0,85–1,1	Расход натрия
0,82 1,63 1,77	Оевые колебания подвижных отражателей
Частотная группа через 0,2 Гц от 0,2 до 2,4 Гц	Ударные компоненты в осевых колебаниях подвижных отражателей

что с ростом мощности амплитуда колебаний ударных компонент растет нелинейно: при мощности выше 1200 кВт наблюдается «лавинный» рост ударных составляющих. Вероятнее всего, такое усиление ударных компонент с ростом мощности связано с механическими, а не газодинамическими эффектами реактивности, поскольку аэродинамические условия вращения подвижных отражателей при изменении мощности меняются незначительно.

В табл. 2 приведены данные по источникам возмущения основных элементов линейчатого спектра колебаний энергии импульсов.

6. БАЗОВАЯ РЕЗОНАНСНАЯ КОМПОНЕНТА В СПЕКТРЕ КОЛЕБАНИЙ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСОВ

Базовая компонента шумов ИБР-2М отражает резонансные свойства а. з. Эти свойства реализуются через амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) реактора и через общий шум реактивности. Квазибелый шум реактивности может быть вызван механическими колебаниями (дрожжанием) кассет и твэлов при турбулентном движении натрия через а. з. Необходимо отметить, что высокая чувствительность реактора ИБР-2М к колебаниям реактивности (в 14 раз выше, чем в стационарном режиме) приводит к появлению заметных возмущений мощности даже при очень малых возмущениях реактивности [9]. АЧХ реактора можно достаточно точно определить с помощью модели динамики реактора, а далее — сравнить с измеренной базовой линией в шумах энергии импульсов. Резонансная область базовой линии в спектре колебаний энергии импульсов и поведение АЧХ в резонансной низкочастотной области колебаний должны совпадать.

Модель динамики ИБР-2М подробно представлена в работах [10–14]. Она основана на блочной структуре, описывающей динамику реактора как систему автоматического регулирования с обратными связями. Параметры модели подробно известны (кинетика, автоматическое регулирование, возмущение). Параметры мощностной обратной связи (МОС) определялись экспериментально [14]. Такое представление модели динамики ИБР-2М полностью отражает все переходные и частотные свойства реактора. Суммарное воздействие МОС на динамику реактора в модели динамики представлено импульсной характеристикой МОС, т. е. изменением реактивности МОС при воздействии единичного импульса мощности. Параметры МОС ИБР-2М описываются тремя слагаемыми следующим образом:

$$w_{rE} = \sum_{j=1}^3 \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \exp\left(-\frac{t}{T_{Tj}}\right), \quad \beta_i/\text{МДж}, \quad t — \text{время, с},$$

$$\Delta r_{Tn} = \sum_{j=1}^3 \Delta r_{Tjn}, \quad \Delta r_{Tjn} = \left(\Delta r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \right) \exp\left(-\frac{T_i}{T_{Tj}}\right),$$

где Δr_{Tn} и Δr_{Tjn} — суммарная реактивность МОС и ее j -е составляющие, соответствующие n -му импульсу мощности в долях ($\beta_i = 1,65 \cdot 10^{-4}$); k_{Tj} , T_{Tj} — коэффициент передачи в $\beta_i/\text{МДж}$ и постоянная времени в секундах j -й составляющей МОС ($j = 1, 2, 3$) соответственно; ΔE_n — отклонение полной энергии за период n -го импульса мощности от базового значения; T_i — период импульсов мощности ($T_i = 0,2$ с).

На рис. 8 приведены измеренные импульсные характеристики быстрой МОС и соответствующие им рассчитанные с помощью модели динамики амплитудно-частотные характеристики реактора при некоторых уровнях мощности.

Выделенные базовые линии спектров в зависимости от времени работы реактора с 2013 по 2025 г. (см. рис. 6) представлены на рис. 9, *a*. На рис. 9, *б* для сравнения приведены АЧХ реактора, соответствующие некоторым вы-

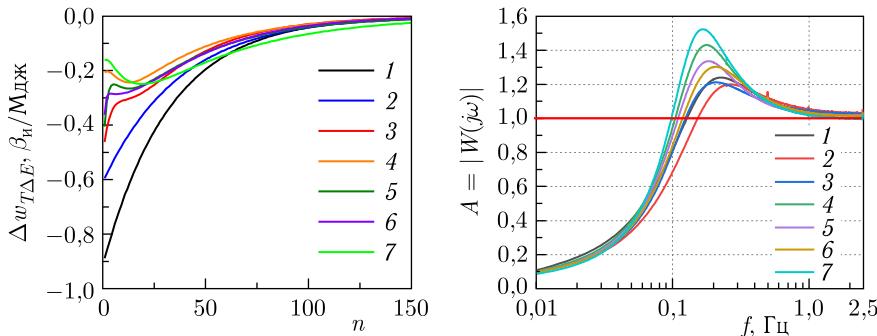


Рис. 8. Импульсная характеристика быстрой МОС ($\beta_i/\text{МДж}$), вызванная одиночным импульсом мощности в момент времени $t = 0$, n — номер импульса (слева), АЧХ реактора ИБР-2М (справа) при некоторых значениях мощности: 0,5 (1); 1,0 (2); 1,2 (3); 1,3 (4, 5); 1,35 (6) и 1,5 (7) МВт

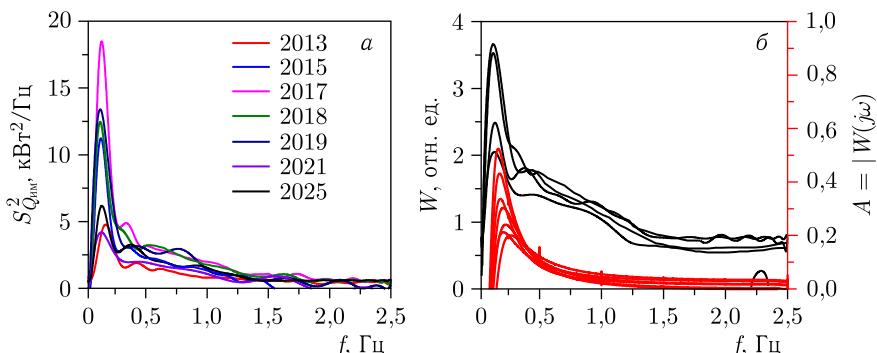


Рис. 9. Изменение базовых линий в спектральной плотности колебаний энергии импульсов ИБР-2М (*а*) и изменение относительной амплитуды базовых линий в сравнении с соответствующей АЧХ ИБР-2М в режиме автоматического регулирования мощности (*б*) в период работы реактора с 2013 по 2025 г.

деленным базовым линиям. Видно полное совпадение резонансной области спектра колебаний мощности с пиком на частоте, близкой к 0,1 Гц, с резонансом в АЧХ реактора.

ВЫВОДЫ

Проведено исследование динамики спектральной структуры шумов энергии импульсов реактора ИБР-2М с выделением базовой структуры резонансного типа с помощью метода базисных элементов. Поведение резонансной компоненты шумов в зависимости от мощности и времени работы реактора показало совпадение с результатами параллельных модельных исследований динамики реактора с помощью амплитудно-частотной характеристики. Сравнение показало полное совпадение резонансной компоненты колебаний энергии импульсов с пиком на частоте, близкой к 0,1 Гц, с резонансом в амплитудно-частотной характеристике реактора ИБР-2М. Этот факт еще раз подтверждает полноту и точность оценки динамических свойств реактора с помощью используемой модели динамики, а также применимость модели и метода базисных элементов к анализу текущего состояния реактора и оценке прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц. Статистический анализ флюктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2012-131. Дубна, 2012.
2. Дикусар Н. Д. Метод базисных элементов // Мат. моделирование. 2010. Т. 22, № 12. С. 115–136; Дикусар Н. Д. // MMCS. 2011. V. 3, No. 4. P. 492–507.
3. Дикусар Н. Д. Кусочно-полиномиальная аппроксимация шестого порядка с автоматическим обнаружением узлов // Мат. моделирование. 2014. Т. 26, № 3. С. 31–48; Дикусар Н. Д. // MMCS. 2014. V. 6, No. 5. P. 509–522.
4. Дикусар Н. Д. Полиномиальная аппроксимация высоких порядков // Мат. моделирование. 2015. Т. 27, № 9. С. 89–109; MMCS. 2016. V. 8, No. 2. P. 183–200.
5. Дикусар Н. Д. Оптимизация решения в задачах кусочно-полиномиальной аппроксимации // Супервычисления и математическое моделирование: Тр. XVI Междунар. конф. / Ред. Р. М. Шагалиев. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 113–122.
6. Korepanova N. V., Dikusar N. D., Pepelyshev Yu. N., Dima M. Neutron Noise Analysis Using the Basic Element Method // Ann. Nucl. Energy. 2019. V. 131. P. 475–482.
7. Dikusar N. Shape Approximation Based on Higher-Degree Polynomials // Proc. of Intern. Conf. “Mathematical Modeling and Comput. Physics” (MMCP2017); Dikusar N. // Eur. Phys. J. Web Conf. 2018. V. 173. 01003; www.epj-conferences.org.
8. Пепельшев Ю. Н., Цогтсайхан Ц. Динамика колебательной неустойчивости реактора ИБР-2М. Анализ шумов. Препринт ОИЯИ Р13-2021-29. Дубна, 2021.
9. Пепельшев Ю. Н. Исследование колебаний подвижных отражателей (энергетический пуск реактора ИБР-2). Препринт ОИЯИ 13-87-564. Дубна, 1987.

10. Попов А. К. Основы управления ядерным реактором. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012.
11. Сумхуу Д. Исследование мощностной обратной связи и ее влияния на устойчивость импульсного реактора ИБР-2М: Дис.... канд. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 2019.
12. Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D. Model of the IBR-2M Pulsed Reactor Dynamics for Investigating Transition Processes in a Wide Range of Power Variation // Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 85. P. 488–493.
13. Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D., Sangaa D. Dynamics Model of the IBR-2M Pulsed Reactor for Analysis of Fast Transition Processes // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12. P. 435–438.
14. Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D. IBR-2M Reactor Power Feedback Parameters Evaluation Using Square Reactivity Oscillations // At. Energy. 2017. V. 122. P. 75–80.

Получено 22 сентября 2025 г.

Редактор *E. B. Григорьева*

Подписано в печать 22.10.2025.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,73. Тираж 110 экз. Заказ № 61197.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/